

王兴富, 张珍明, 黄凯文, 等. 贵阳市典型茶园种植土壤和茶叶的重金属含量特征[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(20): 230–238.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.20.033

贵阳市典型茶园种植土壤和茶叶的重金属含量特征

王兴富^{1,2}, 张珍明³, 黄凯文¹, 马 珍¹, 文锡梅⁴, 黄先飞¹

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州贵阳 550001; 2. 贵阳康养职业大学, 贵州贵阳 550081;
3. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025; 4. 贵州科学院贵州省山地资源研究所, 贵州贵阳 550001)

摘要: 为了解贵阳市典型茶园土壤和茶叶中重金属元素含量的分布特征, 掌握该区域茶园土壤中重金属污染现状以及茶叶中重金属元素的富集程度, 并明确关键污染因子, 促进茶园科学管理以实现绿色可持续发展。分别采集贵阳市乌当、开阳、清镇和花溪茶园土壤和对应的茶叶样品, 采用电感耦合等离子体 (ICP) 和原子荧光光度计 (AFS) 分别测定土壤和茶叶样品中的铅 (Pb)、镉 (Cd)、汞 (Hg)、砷 (As)、铜 (Cu)、镍 (Ni)、锌 (Zn) 和铬 (Cr) 共 8 种主要重金属元素的含量; 分别使用地积累指数 (I_{geo})、潜在生态风险指数 (RI) 评价单元元素污染、多元素综合生态风险, 再用生物富集系数 (BCF)、单项污染指数 (P_i) 对茶叶重金属的生物富集水平、受污染程度进行分析。土壤中 Cd、Hg 的平均含量超出有机茶园土壤的限值标准, 茶叶中的 Ni、Cr 含量分别超出食品安全污染物限量、茶叶的限量标准。Hg 在 4 个茶园、Cd 在清镇和乌当茶园及 Cu 在花溪茶园土壤中的 $I_{\text{geo}} > 0$, 且 $\text{Hg} > \text{Cd}$, 其余元素的 I_{geo} 普遍 < 0 ; 不同茶园多种重金属元素的 RI 排序为清镇 $>$ 开阳 $>$ 花溪 $>$ 乌当, 对应的中度生态风险率依次为 83.3%、50.0%、33.3%、16.7%。茶叶中不同重金属元素的 BCF 为 0.04 ~ 1.90, 仅 Cd 的 BCF > 1 , 且 BCF 的排序为乌当 (2.10) $>$ 花溪 (2.04) $>$ 开阳 (1.75) $>$ 清镇 (1.70)。同时, 茶叶中仅 Cd、Hg 的 $P_i > 1$, 且 Hg 的 $P_i > \text{Cd}$ 的 P_i ; 各地茶叶受到 Hg 污染的排序为开阳 $>$ 花溪 $>$ 乌当 $>$ 清镇, 受到 Cd 污染的程度排序为乌当 $>$ 花溪 $>$ 开阳 $>$ 清镇。贵阳茶园土壤、茶叶主要受到 Hg、Cd 污染, 以轻微污染为主且表现为 $\text{Hg} > \text{Cd}$, 而 Pb、As、Cu、Ni、Zn、Cr 相对安全。相对的, 清镇茶园土壤、茶叶受到的重金属污染程度要高于其他茶园, 乌当茶园受到的污染程度最低。

关键词: 茶园土壤; 重金属; 污染评价; 生物富集; 贵阳市

中图分类号: X53; S571.106 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2023)20-0230-09

茶 [*Camellia sinensis* (L.) O. Ktze.] 是世界上

主要的饮料之一, 人类对茶及其衍生产品的饮用量仅次于水。据统计, 全世界饮茶人数超过 20 亿人, 约占世界总人数的 1/3^[1]。茶树是我国重要的经济作物, 茶树种植及衍生产品是我国重要的经济模式^[2]。据农业农村部种植管理司 2017 年统计, 全国可采摘茶园面积为 305 万 hm^2 , 其产量可达 268 万 t, 两者分别约占全球总量的 45.9%、35.5%^[2-3]。由此看出, 茶树种植及其衍生产品是我国出口创汇的重要渠道, 是促进居民创收的有效方式^[4-5]。贵州适宜

收稿日期: 2022-12-07

基金项目: 贵阳市科技计划 (编号: [2021]3-30、[2021]3-27、[2022]3-7); 中央引导地方科技发展资金 (编号: 黔科中引地 [2022]4035); 铜仁市科技计划 (编号: 铜市科研[2021]24)。

作者简介: 王兴富 (1990—), 男, 贵州榕江人, 博士, 副教授, 主要从事喀斯特环境演变与生态建设研究。E-mail: 754957282@qq.com。

通信作者: 黄先飞, 博士, 副研究员, 主要从事环境科学方面的研究。

E-mail: hxfsjws@gznu.edu.cn。

[29] 闫瑞端, 卫智军, 乌仁其其格, 等. 微生物肥料对呼伦贝尔打孔羊草甸草原土壤微生物及酶活性的影响研究[J]. 环境学报, 2017, 26(4): 597–604.

[30] 安雨丽, 李顺晋, 张育文, 等. 有机肥施用年限对菜地重金属累积迁移的影响[J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2022, 44(9): 41–51.

[31] Turull M, Fontàs C, Díez S. Conventional and novel techniques for the determination of Hg uptake by lettuce in amended agricultural peri-urban soils [J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 40–46.

[32] Regkouzas P, Diamadopoulos E. Adsorption of selected organic micro-pollutants on sewage sludge biochar [J]. Chemosphere, 2019, 224: 840–851.

[33] DalCorso G, Manara A, Furini A. An overview of heavy metal challenge in plants: from roots to shoots [J]. Metallomics, 2013, 5(9): 1117–1132.

[34] Ismael M A, Elyamine A M, Moussa M G, et al. Cadmium in plants: uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers [J]. Metallomics, 2019, 11(2): 255–277.

茶树种植和生长的自然环境得天独厚,是茶叶种植与产量大省^[6]。据统计,截至 2020 年底贵州茶园种植面积超过 4 667 万 hm^2 ,干茶产量 43.6 万 t,产值达 410 亿元,分别居全国的第 1、第 3、第 1 位^[7]。因此,推进茶树种植及相关产业的发展成为巩固和衔接脱贫攻坚成果、推进乡村振兴战略的重要举措。土壤重金属污染抑制了茶树的健康生长,从而影响茶叶的产量和品质安全^[8]。因此,开展针对贵阳市典型茶场土壤重金属污染状况及生物富集特征的研究,可为进一步优化茶园管理、提升茶叶产量及品质和实现绿色可持续发展提供参考。随着现代工农业的发展,“三废”的不合理排放、工业化肥及农药的施用等使得土壤受到外源重金属的不同程度的污染^[9]。此外,贵州喀斯特山地普遍分布一套黑色岩系,其土壤中砷(As)、镍(Ni)、钒(V)、铬(Cr)、锌(Zn)和钼(Mo)等多种重金属含量普遍高于背景值,并且在农作物的根茎叶中存在一定富集^[10]。由于土壤中的重金属元素可通过农作物吸附,并沿食物链传递转移而发生富集,使其毒性具有放大效果^[11-12]。当长期过量食用重金属含量超标的农产品时,容易引起重金属中毒,进而可能使人患上多种慢性疾病^[13-14]。茶园地土壤普遍偏酸性,在酸性的土壤环境中容易使重金属元素活化,从而提高其活性组分比例^[15-16],降低土壤养分的有效成分含量,影响茶叶的产量和品质^[17]。例如,凌云等通过对西南地区土壤酸化特征与重金属形态活性的耦合关系进行研究,指出土壤酸化可使重金属镉(Cd)和铅(Pb)向高活性的交换态转化,从而促进其在作物中的富集^[18]。郭人豪等对贵阳市茶园土壤、茶叶中 Pb 含量的相关性进行分析,得出茶园土壤 Pb 含量与茶树不同部位的 Pb 含量呈显著正相关;茶树不同部位的 Pb 含量为 1.12 ~ 4.62 mg/kg,其含量排序表现为细根 > 主根 > 老叶 > 侧茎 > 主茎 > 芽 > 嫩芽^[1]。郑永林等对乌当茶园土壤中 Pb、Cd、Cr、汞(Hg)、铜(Cu)和 As 的含量进行测定,并评价其污染特征,结果表明,Cd 是茶园土壤重金属污染的主要因子,其余因子为安全水平^[9]。任艳芳等对开阳茶园土壤微量元素的有效成分进行分析,指出土壤中铁(Fe)、Zn 的有效成分丰富,锰(Mn)、Cu 的有效成分适中,不同微量元素的有效成分之间具有一定的正相关性且受到 pH 值影响^[19]。而何璐君通过对开阳茶园土壤的 Pb、Cd、Cr、Cu、Hg、As 进行调查得出,几种重金属元素含量

间的差异较大,并且受到不同程度的污染,其中 Hg 是主要因子,其次是 Cd^[20];对遵义县茶园土壤相同重金属元素污染状况进行对比分析发现,均存在不同程度的污染,且 Cd、Hg 是主要因素^[21]。此外,刘凯对贵阳市邻近县域贵定县 5 个乡(镇)茶园土壤的 Pb、Cd、Cr、Cu、Hg、As 进行调查和污染评价,指出 Hg、Cd 为主要因子^[22]。综上所述,贵阳市乃至贵州省不同地区的茶园地土壤存在不同程度的重金属元素富集情况,部分地区存在一定程度的污染,集中体现在 Hg、Cd 这 2 种元素上。然而,这些较早的研究及调查缺乏持续的跟踪,近年来关于贵阳市不同区域茶园土壤和茶叶重金属污染及生物富集特征的报道较少。为此本研究选择贵阳市规模化种植的乌当区、开阳县、清镇市和花溪区的 4 个典型茶场作为研究对象,采集土壤、茶叶样品,运用地累积指数(I_{geo})、潜在生态风险指数(RI)法、生物富集系数(BCF)及单项污染指数系统地对土壤、茶叶的重金属污染和富集情况进行分析^[23-25]。本研究通过探明不同区域茶园土壤及茶叶重金属含量、受污染情况和生物富集特征,可为贵阳市茶园管理提升茶叶产量品质、实现绿色可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵阳市位于贵州省的中部(106°07' ~ 107°17' E, 26°11' ~ 26°55' N),是贵州省政治经济文化中心,是西南地区重要的中心城市和物流中转地。贵阳地处云贵高原向四川盆地、湖南丘陵过渡的斜坡地带,属于第二级阶梯地势,是长江、珠江流域的分水岭区域;区域内地势绵延起伏,丘陵、盆地、谷地及洼地相间分布;平均海拔在 1 100 m 左右,相对高差为 100 ~ 200 m,总体上呈西南高东北低的地势^[10]。研究区气候类型属于亚热带湿润温和型气候,主要受到昆明—贵阳静止锋的影响,处于费德尔环流圈,常年受西风带控制,年平均气温为 15.3 °C,冬无严寒夏无酷暑。由于该地夏季东南亚热气团迎风面上,使得气温上升、雨量增大,年均降水量达 1 129.5 mm^[12]。全市林业资源丰富,森林覆盖率达 39%,主要植被类型为马尾松、杉木、柏树以及杜仲、红豆杉等珍贵药用植被。土地利用类型主要有耕地、园地、林地、建设用地及未利用地。研究区内土壤类型以黄壤、石灰土、水稻土为主,适合种植谷物、蔬菜及经济作物等,是茶叶及衍生产品的重要

生产基地。

1.2 样品采集与处理

以贵阳市乌当区、开阳县、清镇市及花溪区 4 个典型传统种植茶园地为研究对象,每个茶园按“S”形布设 6 个采样点,每个采样点采用梅花点法在约 1 m^2 范围内,采集对角线上 5 个点的表层 ($0\sim 20\text{ cm}$) 土壤,充分混合后取约 1 kg ,同时采集对应样点上的茶叶作物样品,共采集 24 份土壤样品,对应采集到 24 份茶叶样品。将采集的土壤、茶叶样品分类装袋并依次编号,同时用 GPS (Columbo A6Gps) 定位仪详细记录所有样点的地理坐标信息。

样品分析前处理:在实验室中将土壤摊开在 A4 纸上自然风干,挑选茶叶并洗净后,置于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 真空干燥箱 (DZF 型,北京科伟永兴仪器有限公司) 内烘干 48 h ,然后用玛瑙研钵研磨,再过 $200\text{ }\mu\text{m}$ 筛装袋备用^[12]。

土壤样品测试前的消解处理:称取约 1 g 土壤样品置于聚四氟乙烯罐中,再加入 30 mL 混酸 ($V_{\text{硝酸}}:V_{\text{氢氟酸}}:V_{\text{高氯酸}}=2:2:1$,所有酸均为分析纯产品,购自国药集团化学试剂有限公司) 静置过夜^[26]。茶叶测试前的消解处理参照 Zhang 等的方法,称取约 0.5 g 研磨好的茶叶样品置于聚四氟乙烯罐中,再加入 30 mL 混酸 ($V_{\text{硝酸}}:V_{\text{高氯酸}}=4:1$) 静置过夜^[27]。将装有经混酸浸泡过夜的土壤、茶叶样品溶液的聚四氟乙烯罐置于高温加热板上进行加热消解,梯度升温至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后持续加热 2 h 。待聚四氟乙烯罐冒白烟且剩余 $2\sim 3\text{ mL}$ 溶液时,用坩埚钳取下冷却至室温,观察罐中溶液颜色是否已变清,否则加入少量混酸重复上述操作直至溶液颜色变清。得到消解好的样品溶液后,用去离子水清洗聚四氟乙烯罐至少 3 次以上并转移至 25 mL 容量瓶中,同时用去离子水定容至 25 mL 待测^[28-29]。用电感耦合等离子体 (ICP) 分析待测溶液中 Cd、Pb、Cu、Zn、Ni、Cr 共 6 种元素的含量。另外,对于土壤、茶叶中的 Hg、As 2 种元素,经混酸浸泡后,用原子荧光光度计 (AFS) 进行分析。土壤样品用平行样本及国家一级标准土壤样本 (GBW07401) 进行质量控制,茶叶样品用平行样品进行质量监控。

1.3 环境风险评估方法

1.3.1 地积累指数 (I_{geo}) 法 地积累指数法是德国著名科学家 Müller 于 1969 年提出的,用于定量评价土壤中单个重金属元素污染程度^[30],其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{k \times B_n} \quad (1)$$

式中: C_n 为样品重金属元素的实测值 (mg/kg); B_n 为背景参照值 (mg/kg); k 为调整常数,一般取 1.5。

根据污染程度,可将 I_{geo} 划分为 0~6 级: $I_{\text{geo}} < 0$, 无污染; $0 \leq I_{\text{geo}} < 1$, 轻微污染; $1 \leq I_{\text{geo}} < 2$, 中度污染; $2 \leq I_{\text{geo}} < 3$, 中强度污染; $3 \leq I_{\text{geo}} < 4$, 强度污染; $4 \leq I_{\text{geo}} < 5$, 较强污染; $I_{\text{geo}} \geq 5$, 极强污染。

1.3.2 潜在生态风险指数 (potential ecological risk index, RI) 法 RI 评价方法由瑞士著名地球化学家 Hakanson 于 1980 年针对沉积物重金属污染而提出^[31],该方法根据沉积物的地质环境特征并结合重金属的生物敏感度,不仅考虑了重金属含量,同时综合考虑元素之间的相互作用和生物毒性响应水平,能够综合反映重金属对生态环境的影响^[27-28]。计算公式如下:

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i}; \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i; \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^r E_r^i = \sum_{i=1}^r (T_r^i \times C_f^i) = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i}) \quad (4)$$

式中: RI 为土壤中多种重金属元素的潜在生态风险指数; E_r^i 为重金属元素 i 的环境风险指数; T_r^i 为金属元素 i 的毒性响应系数及环境对该重金属元素的敏感度; C_f^i 为元素 i 的污染程度; C_s^i 、 C_n^i 分别表示元素 i 的实测值、对照值, mg/kg 。

在 Hakanson 潜在生态风险评价体系中,针对 Hg、As、Cd、Pb、Cu、Cr、Zn、Ni 8 种重金属污染物,对应的毒性响应系数依次为 40、10、30、5、5、2、1、5^[32-33]。由公式 (4) 可知, RI 与参评因子和数量有关,其毒性相应系数越大、数量越多, RI 就越大,将其划分为轻微、中等、强、很强 4 个等级 (表 1)。

表 1 潜在生态风险指数分级标准

评级	E_r^i	单因子生态风险程度	RI	综合潜在风险程度
I	< 40	轻微	< 150	轻微
II	$40 \sim < 80$	中等	$150 \sim < 300$	中等
III	$80 \sim < 160$	强	$300 \sim < 600$	强
IV	$160 \sim < 320$	很强	≥ 600	很强
V	≥ 320	极强		

1.3.3 生物富集系数法 生物富集系数 (bioconcentration factors, BCF) 法^[12,34]能够表达农作物对重金属的富集水平,因此本研究采用茶叶中不

同重金属含量与相应的土样进行比较,用以描述茶叶对不同重金属元素的吸附转移、积累能力,从而体现重金属在“土壤-茶叶”链中迁移的难易度,公式如下:

$$BCF=\frac{C_i}{C_s}。$$

(5)

式中: C_i 、 C_s 分别表示茶叶样品 i 、对应土壤样品 s 中的重金属含量。

另外,茶叶不同重金属元素的污染情况参考范晨子等的单项污染指数法^[33],其公式如下:

$$P_i=\frac{C_i}{S_i}。$$

(6)

式中: P_i 为茶叶中污染物 i 的环境质量指数; C_i 为污染物 i 的实测浓度,mg/kg; S_i 为污染物 i 的参考标准。 $P_i\leq 1$ 表示无污染, $P_i>1$ 表示有污染, P_i 越大,表明污染越严重^[35]。

2 结果与分析

2.1 茶园土壤中重金属含量的统计

由表 2 可以看出,贵阳市茶园土壤中 Pb、Cd、Hg、As、Cu、Ni、Zn、Cr 的平均含量分别为 30.88、

0.33、0.30、20.72、43.59、31.03、70.95、74.26 mg/kg,茶园土壤 pH 值在 4.0~5.0 之间。不同重金属元素的平均变异系数在 0.27~0.64 之间,为中强度变异水平^[36],其中 Pb、Hg、Cr 含量为中度变异水平,其余重金属元素达高度变异程度,表明贵阳茶园土壤中的不同重金属存在一定程度的富集,其中 Cd、Hg 的富集程度较大。参考有机茶土壤条件和农用地土壤污染限值,仅 Cd、Hg 的平均含量分别超出有机茶园土壤限值的 65%、100%,样品超标率分别为 75%、100%,而 Pb、As、Cu、Ni、Zn、Cr 的平均含量均不同程度地低于参考值;乌当茶园土壤中的 Cd、Hg 含量分别超限值 10%、73%,开阳茶园土壤中的平均 Cd、Hg 含量分别超出限值 95%、100%,清镇茶园土壤中 Cd、Hg、Cu、Cr 含量分别超出限值 130%、140%、7%、19%,花溪茶园土壤中的 Cd、Hg、Cu 含量分别超出限值 35%、100%、59%。此外,不同茶园土壤中的 Cd 含量超标程度排序为清镇>开阳>花溪>乌当,Hg 含量超标程度排序为清镇>花溪=开阳>乌当,表明清镇茶园土壤的 Cd、Hg 含量普遍高于其他茶园。

表 2 贵阳市茶园土壤重金属含量特征

茶园	特征参数	含量 (mg/kg)								pH 值
		Pb	Cd	Hg	As	Cu	Ni	Zn	Cr	
乌当	均值	22.95	0.22	0.26	18.38	25.26	22.44	66.43	66.89	4.32
	变异系数	0.31	0.11	0.26	0.50	0.30	0.18	0.22	0.21	0.04
开阳	均值	34.30	0.39	0.30	18.43	15.84	22.84	41.90	46.18	4.52
	变异系数	0.37	0.54	0.32	0.50	0.40	0.43	0.32	0.28	0.04
清镇	均值	39.03	0.46	0.36	28.08	53.61	42.70	104.19	106.75	4.78
	变异系数	0.09	0.26	0.23	0.43	0.17	0.09	0.07	0.08	0.04
花溪	均值	27.26	0.27	0.30	17.92	79.66	36.15	71.28	77.21	4.47
	变异系数	0.23	0.37	0.16	0.31	0.24	0.56	0.24	0.23	0.12
总体	均值	30.88	0.33	0.30	20.72	43.59	31.03	70.95	74.26	4.52
	变异系数	0.32	0.47	0.27	0.48	0.64	0.45	0.37	0.35	0.08
有机茶产地环境条件 ^[37]		50.00	0.20	0.15	40.00	50.00			90.00	4.00~6.50
农用地土壤污染风险管控标准 ^[38]							60	200		≤5.5

2.2 茶叶中重金属含量统计

如表 3 所示,茶叶中 Pb、Cd、Hg、As、Cu、Ni、Zn、Cr 的平均含量分别为 1.27、0.52、0.23、1.42、9.42、11.04、13.45、14.46 mg/kg,对应的变异系数分别为 0.58、0.48、0.64、0.29、0.21、0.37、0.35、0.31,均为中高度变异水平,其中 Pb、Cd、Hg 及 Ni 的含量差异达到高度变异程度。茶叶中的 Ni 含量超出国家卫

健部门对食品的限量值,Cr 含量则超出农业农村部关于茶叶中 Cr 含量的限量标准,Ni、Cr 含量分别超出限值 1 004%、189%。不同茶园的茶叶均表现出 Ni、Cr 含量超标,其他重金属元素含量均不同程度地低于标准值;其中乌当茶园茶叶的 Ni、Cr 含量分别超标 1 151%、190%,开阳茶园茶叶的 Ni、Cr 含量分别超标 726%、135%,清镇茶园茶叶的 Ni、Cr 含量

分别超标 925%、200%，花溪茶园茶叶的 Ni、Cr 含量分别超标 1 213%、231%。不同茶园茶叶中的 Ni 含量超标程度排序为花溪 > 乌当 > 清镇 > 开阳，Cr 含

量的超标程度排序为花溪 > 清镇 > 乌当 > 开阳。由此看出，花溪茶园茶叶中 Ni、Cr 含量的超标程度普遍高于其他茶园。

表 3 茶叶中的重金属含量特征

茶园	特征参数	含量(mg/kg)							
		Pb	Cd	Hg	As	Cu	Ni	Zn	Cr
乌当	均值	1.07	0.46	0.18	1.15	10.21	12.51	13.47	14.54
	变异系数	0.44	0.54	1.01	0.46	0.12	0.34	0.40	0.38
开阳	均值	1.34	0.46	0.26	1.55	6.97	8.26	10.19	11.77
	变异系数	0.40	0.50	0.71	0.16	0.19	0.42	0.45	0.36
清镇	均值	1.10	0.70	0.26	1.38	9.43	10.25	14.23	14.98
	变异系数	0.35	0.43	0.38	0.37	0.06	0.24	0.26	0.27
花溪	均值	1.57	0.45	0.23	1.59	11.07	13.13	15.92	16.55
	变异系数	0.83	0.31	0.63	0.14	0.16	0.35	0.25	0.25
平均	均值	1.27	0.52	0.23	1.42	9.42	11.04	13.45	14.46
	变异系数	0.58	0.48	0.64	0.29	0.21	0.37	0.35	0.31
参考值		5 ^[39]	1 ^[40]	0.3 ^[40]	2 ^[40]	60.0 ^[41]	1 ^[39]	40.6 ^[42]	5 ^[40]

2.3 茶园土壤的重金属污染评价

运用地积累指数法对茶园土壤的重金属污染情况进行评价,结果(图 1)表明,不同茶园土壤中的大部分重金属元素的 $I_{geo} < 0$ 。仅 Cd 在清镇和乌当茶园、Hg 在 4 个茶园及 Cu 在花溪茶园土壤中 $I_{geo} > 0$,但都 < 1 。其中,乌当茶园土壤存在轻微程度的 Hg 污染;开阳、清镇茶园土壤存在轻微程度的 Cd、Hg 污染,且 Hg 的污染程度均略高于 Cd;花溪茶园土壤存在轻微程度的 Hg、Cu 污染,而 Hg 的污染程度高于 Cu。此外,存在 Cd 污染的茶园土壤表现出清镇 > 开阳,受 Hg 污染的茶园土壤则表现出清镇 > 花溪 > 开阳 > 乌当,其中开阳、花溪茶园土壤受 Hg 污染的程度较为接近。

示,不同茶园土壤中 Cd、Hg 含量的潜在生态风险指数明显高于其他元素,其中乌当茶园土壤中的 Hg 含量达到中度的生态风险水平,开阳、清镇茶园土壤中的 Cd 含量为中度风险,而 Hg 含量则达到强度生态风险,花溪茶园土壤的 Cd、Hg 含量均达到中度的生态风险水平,且 $Hg > Cd$ 。其余重金属元素在不同茶园土壤中的生态风险程度普遍较低,均为轻微风险等级。不同茶园土壤 Cd、Hg 含量的潜在生态风险均表现为清镇 > 开阳 > 花溪 > 乌当,其中 Cd 含量在开阳茶园土壤中的轻微、中度及强的生态风险率均为 33.3%,在清镇茶园土壤的中度、强度生态风险率分别为 66.6%、33.3%,而在花溪茶园土壤的轻微、中度风险率则均为 50.0%;Hg 在乌当茶园土壤的中度、强度风险率分别为 83.3%、16.7%,在开阳茶园土壤中的中度、强度生态风险率分别为 66.7%、33.3%,在清镇茶园地土壤中的中度、强度生态风险率分别为 16.7%、83.3%,而在花溪茶园地的中度、强度生态风险率则分别为 33.3%、66.7%。由此看出,Cd 的中强度生态风险率表现出清镇 > 开阳 > 花溪,Hg 的强度生态风险率表现出清镇 > 花溪 > 开阳 > 乌当。

另外,对不同茶园土壤中多种重金属的潜在生态风险程度进行综合评价发现,不同茶园土壤中重金属的综合生态风险排序为清镇 > 开阳 > 花溪 > 乌当,其中清镇、开阳茶园土壤的多种重金属元素的综合潜在生态风险达到中度水平,且清镇茶园的

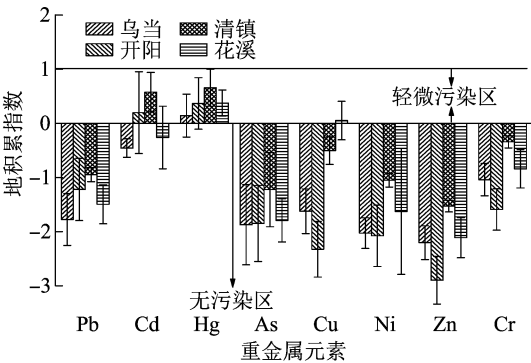


图 1 地积累指数评价茶园土壤重金属元素污染

用潜在生态风险指数法对不同茶园土壤中各重金属元素的生态风险程度进行评价,其结果与地积累指数法相似,但存在一定程度的差异。图 2 显

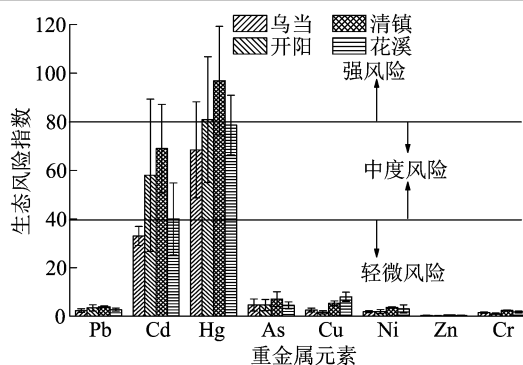


图2 茶园土壤重金属元素的生态风险

风险水平明显高于开阳,而花溪、乌当茶园的潜在生态风险为轻微级别(图3-a)。此外,通过对

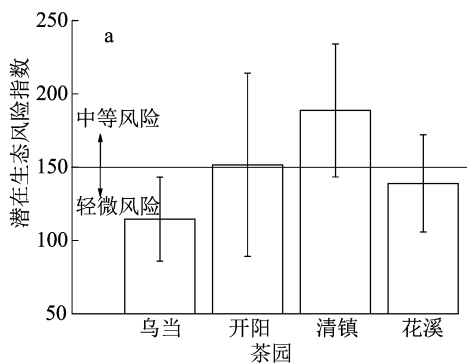
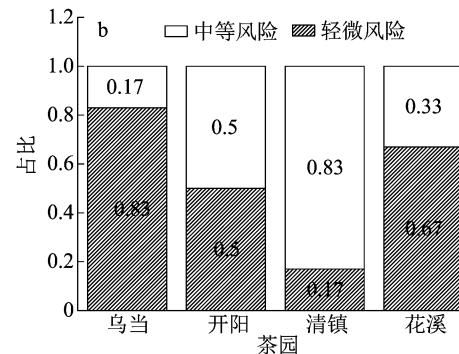


图3 茶园土壤多种重金属元素的综合生态风险



2.4 茶叶重金属的生物富集特征

运用生物富集系数法对茶叶的重金属富集程度进行分析,由图4可以看出,不同重金属元素的平均生物富集系数在0.04~1.90之间。其中,除Cd的生物富集系数>1外,其他不同重金属元素在不同茶园茶叶中的富集系数都<1,排序为Cd(1.90)>Hg(0.80)>Ni(0.45)>Cu(0.32)>Cr(0.23)>Zn(0.22)>As(0.08)>Pb(0.04);茶叶中Cd的富集系数显著高于其他重金属元素,Hg的富集系数也相对较高。通过计算发现,Cd的生物富集系数>1的样本比例为75.00%,Hg的生物富集系数>1的样本占29.16%,而Ni的生物富集系数>1的样本仅为4.17%,其余所有样本的重金属元素生物富集系数均<1。不同茶园茶叶的Cd生物富集程度排序为乌当(2.10)>花溪(2.04)>开阳(1.75)>清镇(1.70),其中乌当的生物富集系数>1的样本数占比为100%,而花溪、开阳、清镇的生物富集系数>1的样本数占比都为66.67%。不同茶园茶叶中Hg的富集系数排序为开阳(0.94)>花溪(0.77)>乌当(0.75)>清镇(0.73),其中开阳、乌当和清镇茶园茶叶富集系数>1的样本占33.33%,而花溪茶

不用风险等级样点的统计计算,得出乌当茶园轻微、中等风险率分别为83.3%、16.7%,开阳茶园的轻微、中等风险率均为50.0%,清镇的轻微、中等风险率分别为16.7%、83.3%,而花溪的轻微、中等风险率分别为66.7%、33.3%。总体上看,不同茶园中等的生态风险率排序为清镇>开阳>花溪>乌当,而轻微风险排序为乌当>花溪>开阳>清镇(图3-b)。相对地,清镇茶园土壤多种重金属污染的综合潜在生态风险明显高于其他茶园,乌当、花溪茶园土壤的生态风险程度则普遍较低,仅为轻微水平,而开阳茶园的个别样点可能存在重金属污染的潜在生态风险。

叶富集系数>1的样本仅为16.67%。不同茶园茶叶中Ni的富集系数排序为乌当(0.59)>花溪(0.53)>开阳(0.44)>清镇(0.24),其中仅花溪出现1个样本的富集系数>1,其他茶园茶叶的样本均无富集系数>1的情况。乌当茶园茶叶中不同重金属的富集系数排序为Cd(2.10)>Hg(0.75)>Ni(0.59)>Cu(0.43)>Cr(0.23)>Zn(0.21)>As(0.09)>Pb(0.05),开阳茶园茶叶中重金属的富集系数排序为Cd(1.75)>Hg(0.94)>Cu(0.50)>Ni(0.44)>Cr(0.28)>Zn(0.27)>As(0.10)>Pb(0.04),清镇茶园茶叶中的重金属富集系数排序为Cd(1.70)>Hg(0.74)>Ni(0.24)>Cu(0.18)>Cr(0.14)>Zn(0.13)>As(0.05)>Pb(0.03),花溪茶园茶叶中的重金属富集系数排序为Cd(2.04)>Hg(0.77)>Ni(0.54)>Zn(0.25)>Cr(0.24)>Cu(0.15)>As(0.09)>Pb(0.06)。由此可见,各茶园茶叶中生物富集最为明显的重金属元素为Cd,其次是Hg;不同茶园的茶叶对As、Pb的富集程度普遍较低。

2.5 茶叶中的重金属污染特征

为了探讨茶园茶叶受重金属的污染程度,参照

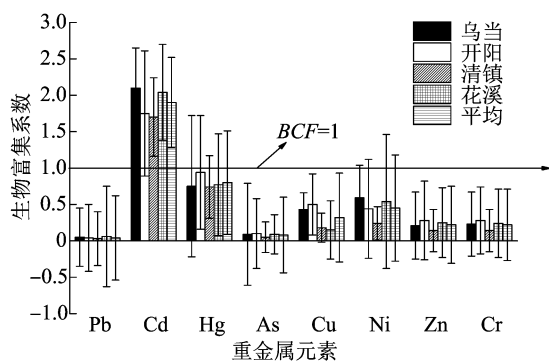


图4 茶叶重金属的生物富集特征

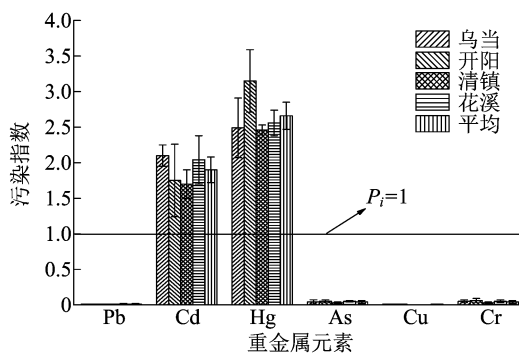


图5 茶叶重金属的污染特征

食品国家安全标准(GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》)对 Pb、Ni 污染的限量值,参照农业农村部对茶叶中 Cd、Cr、Hg 和 As 含量的标准值(NY 659—2003《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》),以茶叶卫生标准对 Cu 含量的限量作为标准(GB 9679—1988《茶叶卫生标准》),以全国茶叶 Zn 含量平均值为参照,采用单因子法对茶叶受重金属的污染程度进行分析。由图 5 可以看出,茶叶中除了 Cd、Hg 的污染指数 >1 以外,其余重金属元素的污染指数均 <1 ,表明不同茶园的茶叶主要受到 Cd、Hg 2 种重金属元素的污染,且受到 Hg 的污染程度高于 Cd。不同茶园的茶叶受到的 Hg 污染的排序为开阳 $>$ 花溪 $>$ 乌当 $>$ 清镇,其中开阳茶园茶叶受到的 Hg 污染明显高于其他茶园;茶叶受到的 Cd 污染程度排序为乌当 $>$ 花溪 $>$ 开阳 $>$ 清镇,其中乌当、花溪茶园中茶叶受到的 Cd 污染相似且明显高于开阳、清镇。此外,乌当茶园中茶叶的 Hg 污染率为 66.67%,而开阳、清镇、花溪茶园中茶叶的 Hg 污染率均为 83.33%。乌当茶园中茶叶的 Cd 污染率为 100%,开阳、清镇茶园均为 66.67%,花溪茶园中茶叶受到的 Cd 污染率为 83.33%。总体而言,研究区茶园中茶叶主要受到 Hg、Cd 2 种重金属元素的污染,受到的 Hg 污染程度要高于 Cd,其中开阳茶园中茶叶受到的 Hg 污染较为明显,乌当、花溪茶园的茶叶受到的 Cd 污染相对较高。

3 讨论

本研究采用有机茶产地环境条件、农用地土壤污染风险管控标准对茶园土壤重金属的污染情况进行评价,其参照值除了 Cd、Cr 外,其他元素普遍低于贵州省表层土壤环境重金属背景值(Pb = 35.2 mg/kg, Cd = 0.659 mg/kg, Hg = 0.11 mg/kg, As = 20 mg/kg, Cu = 32 mg/kg, Ni = 39.1 mg/kg,

Zn = 99.5 mg/kg, Cr = 95.9 mg/kg)^[43]。通过对比发现,茶园土壤中的平均 Hg、As、Cu 含量高于土壤背景值,而 Pb、Cd、Ni、Zn、Cr 含量均低于背景值,由此推测茶园土壤中的 Pb、Cd、Ni、Zn、Cr 几种重金属元素含量可能主要受地质背景含量的影响^[10,12],而 Hg、As、Cu 含量不仅受土壤背景含量的影响,还可能受外界输入的影响(如使用工业化肥及农药等),从而导致其含量在一定程度上大于背景值。此外,通过分析茶园土壤中不同重金属元素的相关性,发现土壤中的 Cd、Hg 含量在 0.05 水平呈显著正相关,而 Cu 与 Ni、Zn、Cr、Ni 与 Zn、Cr 及 Cr 与 Zn 几种元素组合在 0.01 水平呈极显著正相关(表 4),表明茶园土壤中部分重金属元素之间具有较强的相互促进关系,可能导致当其中某个元素得到加强时,使得关联的元素含量也得到一定程度的提高。同时,本研究得到的茶园土壤中不同重金属元素含量与郭人豪等的研究结果^[1,9,20]相似,且都普遍不同程度地低于背景参考值。由于贵州省土壤重金属背景值普遍偏高,但除了 Cd、Cr 含量的背景值高于茶园产地、农业用地限值外,其他元素含量的背景值均低于标准限量值,而茶园土壤中的重金属元素普遍低于背景值,表明贵阳茶园土壤重金属含量普遍符合茶园种植标准^[44-45]。

此外,在评价土壤重金属污染时,可能导致 Cd、Cr 污染系数偏高,而 Pb、Hg、As、Cu、Ni、Zn 的污染系数偏低。若以贵州表层土壤环境背景值作为参考,计算不同茶园土壤中重金属元素的地积累指数得出,除 Hg 在乌当、开阳及花溪茶园为轻微污染以及在清镇为中等污染外,其他元素均为无污染水平。另外,如果以潜在生态风险法参照背景值进行计算,除了 Hg 达到强度污染水平外,其他重金属元素均为轻微污染水平,并且其风险系数普遍偏低。总体上看,本研究中不同茶园土壤主要受到 Hg 污

表 4 茶园土壤重金属元素含量间的相关性

项目	相关系数						
	Pb 含量	Cd 含量	Hg 含量	As 含量	Cu 含量	Ni 含量	Zn 含量
Cd 含量	0.167	1.000					
Hg 含量	0.178	0.453 *	1.000				
As 含量	0.241	0.207	0.089	1.000			
Cu 含量	0.061	0.015	0.068	0.043	1.000		
Ni 含量	0.152	0.286	0.197	0.158	0.700 **	1.000	
Zn 含量	0.164	0.244	0.253	0.348	0.586 **	0.802 **	1.000
Cr 含量	0.185	0.256	0.266	0.327	0.634 **	0.831 **	0.996 **

注: *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

染,其次是 Cd;若按地积累指数计算,本研究中的土壤都呈轻度污染水平,按潜在生态风险指数评价法计算,本研究中个别样区达到中强度风险等级,但总体上仍以轻微污染为主。这与何璐君对开阳茶园土壤中的 Pb、Cd、Cr、Hg、Cu、As 污染进行评价后指出其主要污染是 Hg、其次是 Cd 的研究结果^[20]一致,还与郑永林等对乌当茶园土壤中 Pb、Cd、Cr、Hg、Cu 和 As 污染进行评价时指出 Cd 是主要污染因子,而其他元素为安全水平的结论^[9]相似。此外,刘凯在对贵阳邻近县域贵定 5 个乡(镇)茶园地土壤中 Pb、Cd、Cr、Hg、Cu、As 的污染情况进行评价时,也指出 Hg 是主要污染因子,其次为 Cd^[22]。由此看出,贵阳市及周边地区茶园土壤普遍受到 Hg、Cd 轻微程度的污染,其余重金属元素的污染程度相对较低,可以忽略不计。

综上所述,鉴于茶园土壤中 Hg、Cd 具有较为显著的正相关性,而 Hg 不仅具有继承土壤成土母质含量的特征,还受使用化肥等外源污染的影响。因此,在茶园种植和管理过程中应尽可能减少和避免工业化肥的使用,降低微量元素 Hg 的外源输入,抑制土壤中 Cd 的积累,从而在一定程度上使土壤中 Hg、Cd 含量降低,防止其污染进一步加剧和扩散。

4 结论

通过对贵阳市典型茶园土壤重金属污染和茶叶生物富集特征进行分析,得出土壤中 Pb、Cd、Hg、As、Cu、Ni、Zn、Cr 的平均含量分别为 30.88、0.33、0.30、20.72、43.59、31.03、70.95、74.26 mg/kg,其中仅 Cd、Hg 的平均含量超出有机茶园土壤的限值标准,且都表现为清镇最高而乌当最低。茶叶中对应的重金属元素平均含量分别为 1.27、0.52、0.23、1.42、9.42、11.04、13.45、14.46 mg/kg,其中 Ni 含

量超出食品安全污染物限量标准,Cr 含量则超出农业农村部对茶叶的限量标准,且花溪茶园茶叶中的 Ni、Cr 含量超标程度相对较高。茶园土壤主要受到 Hg、Cd 污染,且 Hg 的污染程度要大于 Cd,而 Hg 污染可能还受外源影响较大。不同茶园土壤受到的 Hg 污染程度排序为清镇>花溪>开阳>乌当,受到 Cd 污染的茶园按污染程度排序为清镇>开阳。不同茶园土壤中多种重金属的综合潜在生态风险排序为清镇>开阳>花溪>乌当,其中清镇、开阳茶园为中度风险水平,且清镇茶园的风险水平明显高于开阳。茶叶中不同重金属元素的平均生物富集系数在 0.04~1.90 之间,排序为 Cd(1.90)>Hg(0.80)>Ni(0.45)>Cu(0.32)>Cr(0.23)>Zn(0.22)>As(0.08)>Pb(0.04),其中仅 Cd 的生物富集系数大于 1,且在不同茶园中茶叶的生物富集系数排序为乌当(2.10)>花溪(2.04)>开阳(1.75)>清镇(1.70)。茶园中茶叶主要受到 Cd、Hg 2 种重金属元素的污染,且 Hg 的污染程度大于 Cd;不同茶园地的茶叶受到 Hg 污染程度的排序为开阳>花溪>乌当>清镇,受到 Cd 污染程度的排序为乌当>花溪>开阳>清镇。综上所述,贵阳市茶园土壤和茶叶主要受 Hg、Cd 2 种重金属元素的污染,且 Hg 的污染程度高于 Cd,其他重金属元素为无污染水平,相对安全。

参考文献:

- [1]郭人豪,任艳芳.贵阳市茶园土壤与茶树中铅含量测定及其相关性[J].贵州农业科学,2013,41(11):179-181.
- [2]张翔宇,尹彤云,周少奇,等.中国植茶省份茶园土壤酸化现状分析[J].贵州科学,2022,40(3):81-85.
- [3]农业农村部种植管理司.2017 年全国各产茶省茶园面积、产量和产值统计[J].中国茶叶,2018,40(6):27.
- [4]桂燕玲,王凌.贵州茶叶出口的现状与趋势研究[J].福建茶

- 叶,2022,44(6):41-43.
- [5]国际茶业委员会. 2022 年 3 月中国茶叶出口各国和地区销量统计[J]. 中国茶叶,2022,44(6):14.
- [6]许 倩. 贵州省茶产业现状与出口促进措施——基于与浙江省的比较分析[J]. 南方农机,2022,53(11):173-175,180.
- [7]李晓雪. 贵州茶叶产业集群竞争力研究——基于 GEM 模型[J]. 昆明学院学报,2023,45(3):42-49.
- [8]黄华斌,林承奇,于瑞莲,等. 安溪铁观音茶园土壤重金属分布及污染评价[J]. 环境化学,2018,37(5):994-1001.
- [9]郑永林,何腾兵,周 康,等. 贵阳市乌当区茶园土壤重金属环境质量状况及其评价[J]. 贵州农业科学,2011,39(4):103-105.
- [10]王兴富,曹人升,吴先亮,等. 喀斯特山地废弃矿区土壤重金属污染评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2021,39(5):29-35.
- [11]曹人升,范明毅,黄先飞,等. 金沙燃煤电厂周围土壤有机质与重金属分析[J]. 环境化学,2017,36(2):397-407.
- [12]王兴富,黄先飞,胡继伟,等. 喀斯特山地 Ni-Mo 废弃矿区周围镉污染及农作物富集特征[J]. 环境化学,2020,39(7):1872-1882.
- [13]李甜田,邹继颖,武双双,等. 饮马河中游不同土地类型重金属分布特征及风险评价[J]. 山西农业科学,2019,47(2):239-244.
- [14]王兴富,曹人升,黄先飞,等. 基于人工智能优化石墨烯纳米复合材料吸附水体重金属污染研究进展[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2021,39(2):112-120.
- [15]颜 鹏,韩文炎,李 鑫,等. 中国茶园土壤酸化现状与分析[J]. 中国农业科学,2020,53(4):795-813.
- [16]李 静,王明锐,张隼嫻,等. 湖北省主要茶园土壤重金属污染现状 & 评价[J]. 绿色科技,2018(24):79-83.
- [17]阳 霜. 都匀毛尖茶园土壤酸化现状分析[J]. 农村经济与科技,2019,30(21):20-22.
- [18]凌 云,刘汉燧,张小婷,等. 西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系[J]. 环境科学,2023,44(1):376-386.
- [19]任艳芳,何俊瑜,张艳超,等. 贵州省开阳茶园土壤有效微量元素状况分析[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):432-435.
- [20]何璐君. 开阳县茶园土壤重金属元素含量及污染评价[J]. 贵州农业科学,2009,37(4):184-186.
- [21]何璐君,王修俊. 遵义县茶园土壤重金属元素含量及污染评价[J]. 湖北农业科学,2011,50(7):1350-1353.
- [22]刘 凯. 贵定县茶园土壤中重金属元素含量及污染评价[J]. 贵州农业科学,2012,40(1):101-103.
- [23]张 迪,周明忠,熊康宁,等. 贵州遵义松林 Ni-Mo 多金属矿区土壤 Mo 污染及农作物健康风险初步评价[J]. 环境化学,2019,38(6):1328-1338.
- [24]张 迪,周明忠,熊康宁,等. 贵州遵义下寒武统黑色页岩区土壤重金属污染和人体健康风险评价[J]. 环境科学研究,2021,34(5):1247-1257.
- [25]徐友宁,张江华,柯海玲,等. 某金矿区农田土壤重金属污染的人体健康风险[J]. 地质通报,2014,33(8):1239-1252.
- [26]曹人升,范明毅,黄先飞,等. 金沙燃煤电厂周围土壤有机质与重金属分析[J]. 环境化学,2017,36(2):398-407.
- [27]Zhang X Z, Sun H W, Zhang Z Y, et al. Enhanced bioaccumulation of cadmium in carp in the presence of titanium dioxide nanoparticles [J]. Chemosphere, 2007, 67(1):160-166.
- [28]Zhong W S, Ren T, Zhao L J. Determination of Pb (lead), Cd (cadmium), Cr (chromium), Cu (copper), and Ni (nickel) in Chinese tea with high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. Journal of Food & Drug Analysis, 2016, 24(1):46-55.
- [29]胡继伟,刘 峰,陈敬安,等. 喀斯特深水湖泊富硒沉积物中 Se 的赋存特征[J]. 环境化学,2013,32(8):1448-1455.
- [30]梁 萍,张 浩,王 济,等. 岩溶山区公路路侧土壤重金属垂直分布及生态危害研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(4):23-29,35.
- [31]Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [32]Fernandez J A, Carballeira A. Evaluation of contamination, by different elements, in terrestrial mosses [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, 40(4):461-468.
- [33]范晨子,郭 威,袁继海,等. 西南地区典型工矿业城市土壤-作物系统中重金属和硒元素特征及评价[J]. 西南农业学报, 2022, 35(8):1909-1919.
- [34]Bonanno G, Raccuia S A. Seagrass *Halophila stipulacea*: capacity of accumulation and biomonitoring of trace elements [J]. Science of The Total Environment, 2018, 633:257-263.
- [35]邹鲤岭,李昌盛,郎学伟. 昆明阳宗海沿岸农田土壤及农作物种污染特征研究与评价[J]. 西南农业学报, 2021, 34(5):1096-1100.
- [36]尚梦佳,周忠发,王小宇,等. 基于支持向量机的喀斯特山区土壤环境质量评价——以贵州北部一茶叶园区为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4):575-583.
- [37]中华人民共和国农业部. 有机茶产地环境条件: NY/T 5199—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [38]生态环境部. 土壤环境治理农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [39]中华人民共和国国家卫生健康委员会. 食品安全国家标准食品中污染物限量: GB 2762—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [40]中华人民共和国农业部. 茶叶中镉、铬、汞、砷及氟化物限量: NY 659—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [41]中华人民共和国卫生部. 中华人民共和国国家标准茶叶卫生标准: GB 9679—1988 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [42]王 峰,陈玉真,单睿阳,等. 大田县茶园土壤和茶叶中锌含量及影响因素分析[J]. 茶叶学报, 2017, 58(4):179-183.
- [43]魏复盛,陈静生,吴燕玉,等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991(4):12-19, 94.
- [44]徐 铖,朱四喜,赵 斌. 草海湿地土壤中重金属铬的垂直分布特征[J]. 北方园艺, 2018(5):118-123.
- [45]刘春林,张 建,彭益书,等. 贵州雷山茶区土壤-茶叶重金属含量特征及饮茶风险评价[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(6):1049-1059.